

· 实验技术及其应用 ·

液相色谱 - 原子荧光联用技术检测海产品中形态砷

方素珍^{1,2}, 林美霞³, 谢维平^{1,2}, 陈林刚^{1,2}, 苏碧玲^{1,2}, 汤炜涛^{1,2}

1. 泉州市疾病预防控制中心理化科, 福建 泉州 362000;

2. 福建医科大学附属泉州疾病预防控制中心, 福建 泉州 362000; 3. 福建医科大学公共卫生学院卫生检验与检疫专业

摘要:目的 建立液相色谱 - 原子荧光联用技术(LC-AFS)检测海产品中 As(III)、DMA、MMA、As(V)四种形态砷的方法。方法 优化检测条件,包括载流的类型及浓度、硼氢化钾浓度、灯电流、负高压、流动相浓度及 pH 等,考察所建立检测方法的参数,包括线性范围、准确度、精密性、检出限等。结果 在 5% 盐酸、5 g/L 氢氧化钠 -20 g/L 硼氢化钾、负高压 270 V、灯主电流 60 mA、流动相 A 为磷酸二氢铵(1 mmol/L, pH 8.5)、流动相 B 为磷酸二氢铵(25 mmol/L, pH 8.0)的条件下,As(III)、DMA、MMA、As(V)线性范围为 0 ~ 100 μ g/L,相关系数均大于 0.999;保留时间 RSD 为 0.2% ~ 1.2%,峰面积 RSD 为 2.1% ~ 4.4%;样品加标回收率为 81.2% ~ 111.6%。结论 方法灵敏度高、准确性好、精密度高,分析时间短,检测效率高,试剂用量少,结果满意。

关键词:海产品;形态砷分析;液相色谱 - 原子荧光联用技术

中图分类号:O657.72 文献标志码:A 文章编号:1003-8507(2024)23-4367-06

DOI: 10.20043/j.cnki.MPM.202407212

Detection of arsenic species in seafood using liquid chromatography - atomic fluorescence spectrometry

FANG Su-zhen*, LIN Mei-xia, XIE Wei-ping, CHEN Lin-gang, SU Bi-ling, TANG Wei-tao

*Department of Physics and Chemistry, Quanzhou Center for Disease Control and Prevention, Quanzhou, Fujian, 362000, China

Abstract: **Objective** To establish a method for detecting four arsenic species—As (III), DMA, MMA, and as (V)—in seafood using liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometry (LC-AFS). **Methods** The detection conditions were optimized, including the type and concentration of the carrier liquid, concentration of potassium borohydride, lamp current, negative high voltage, mobile phase concentration, and pH. Parameters of the established detection method were evaluated, including linear range, accuracy, precision, and detection limit. **Results** Under the conditions of 5% hydrochloric acid, 5 g/L sodium hydroxide-20 g/L potassium borohydride, a negative high voltage of 270 V, lamp main current of 60 mA, mobile phase A as ammonium dihydrogen phosphate (1 mmol/L, pH 8.5), and mobile phase B as ammonium dihydrogen phosphate (25 mmol/L, pH 8.0), the linear range for As(III), DMA, MMA, and As(V) was 0-100 μ g/L, with correlation coefficients exceeding 0.999. The relative standard deviation (RSD) for retention time ranged from 0.2% to 1.2%, while the RSD for peak area ranged from 2.1% to 4.4%. The recovery rate for spiked samples was between 81.2% and 111.6%. **Conclusion** The method demonstrates high sensitivity, accuracy, and precision, with a short analysis time and high detection efficiency, while requiring minimal reagent usage, yielding satisfactory results.

Keywords: Seafood; Arsenic species analysis; Liquid chromatography-atomic fluorescence spectrometry

近年来,海洋生物受到砷等重金属污染日益严重,人体食用受到污染的海产品,可危害健康^[1-2]。海产品中的砷包含无机砷和有机砷,具有多种形态。其无机砷主要为剧毒的三价砷(As(III))、五价砷(As(V)),有机砷包含有毒的一甲基砷(MMA)、二甲基砷

(DMA)及几乎无毒的砷甜菜碱(AsB)等^[3-5]。因此,检测海产品中 As(III)、As(V)、MMA、DMA 四种形态砷的含量,对评价海产品中砷的毒性大小具有重要价值。目前,海产品中砷形态分析的方法主要有液相色谱 - 原子荧光光谱法(LC-AFS)、液相色谱 - 原子吸收光谱法(LC-AAS)、液相色谱 - 电感耦合等离子体质谱法(LC-ICP-MS)、气相色谱 - 电感耦合等离子体质谱法(GC-ICP-MS)、毛细管电泳 - 电感耦合等离子体质谱法(CE-ICP-MS)等^[6-8]。其中以 LC-AFS 法、LC-ICP-MS 法应用较多。王林裴等人^[9]应用 LC-AFS

基金项目:泉州市科技项目(2023NS077)

作者简介:方素珍(1979—),女,本科,副主任技师,研究方向:理化检测工作

通信作者:谢维平, E-mail: xweiping2000@163.com

法测定水产动物及其制品中的形态砷,检出限低,检测效率较高。LC-AFS 法集成了多组分高效分离优势和原子荧光光度法的高灵敏度,运行成本较低,分析前仪器升温时间短,操作简单。

目前基于 LC-AFS 分析海产品中 As(III)、DMA、MMA、As(V)等形态的研究,有的仅对原子荧光的检测条件作优化^[9],有的仅简单对液相色谱的保留时间、分离度作优化^[11-12],缺少对色谱条件及原子荧光条件系统的探讨与优化。因此,文章对该方法进行更全面更深入的研究,以探讨液相色谱条件和原子荧光条件对形态砷的响应强度、保留时间、分离度、灵敏度以及检测时间、试剂用量、色谱柱寿命等方面的影响,优化了仪器分析条件,建立了液相色谱-原子荧光联用技术检测海产品中形态砷的方法,并用建立的方法对实际样品进行检测,取得较好效果。

1 材料与方法

1.1 实验仪器 液相色谱-原子荧光联用仪(LC-AFS 9560,北京海光仪器有限公司),pH 计(PHSJ-3F,上海仪电科学仪器股份有限公司),超纯水仪(Milli-Q,德国默克集团),电子天平(AL-204,梅特勒-托利多科技有限公司),鼓风干燥箱(DHG-9140A,上海一恒科学仪器有限公司),高速离心机(Eppendorf Centrifuge 5920 R,德国艾本德有限公司),振荡器(DMV-16,广东省科实实验室设备有限公司),C18 小柱,0.45 μm 滤膜。

1.2 实验试剂 硝酸、盐酸、硼氢化钾均为优级纯;氢氧化钠、氨水、磷酸二氢铵、正己烷均为分析纯;超纯水(电阻率大于 18.2 $\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$);亚砷酸根溶液[As(III),GBW08666,75.5 $\mu\text{g/g}$]、砷酸根溶液[As(V),GBW08667,17.5 $\mu\text{g/g}$]、一甲基砷溶液(MMA,GBW08668,25.1 $\mu\text{g/g}$)、二甲基砷溶液(DMA,GBW08669,52.9 $\mu\text{g/g}$)、砷甜菜碱溶液(AsB,GBW08670,38.8 $\mu\text{g/g}$)、砷标准物质均购自中国计量科学研究院,均以 As 计。

1.3 样品 采集泉州市本地海产品 64 份,包含鱼、虾、蟹、壳类等,进行检测分析。

1.4 样品前处理 参考《食品中总砷及无机砷的测定》GB 5009.11-2014(简称国标方法)的海产品前处理方法。除以 6 000 r/min 离心 5 min,样品下层清液无需 C18 柱净化,直接经 0.45 μm 水系滤膜过滤外,其余同国标方法。

1.5 标准溶液配制

1.5.1 砷标准中间液 分别吸取适量 As(III)溶液、As(V)溶液、MMA 溶液、DMA 溶液,用超纯水配制成 1.0 mg/L 混合标准中间液。

1.5.2 砷混合标准溶液系列 分别吸取适量四种 1.0 mg/L 砷混合标准中间液,用超纯水稀释至浓度为 0.0、5.0、10.0、20.0、30.0、50.0 和 100.0 $\mu\text{g/L}$ 标准系列。

1.6 仪器分析条件

1.6.1 原子荧光光谱 载流:5%盐酸;还原剂:5 g/L 氢氧化钠-20 g/L 硼氢化钾;负高压:270 V;砷灯主/辅电流:60/30 mA;原子化器高度:8 mm;载气流速:400 ml/min;屏蔽气流速:900 ml/min;蠕动泵转速:45 r/min。

1.6.2 液相色谱 PRP-X100 阴离子交换柱(250 \times 4.1 mm,10 μm);流动相 A:1 mmol/L $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$,pH 8.5;流动相 B:25 mmol/L $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$,pH 8.0;流速 1.0 ml/min;进样量:100 μl ;柱温:40 $^\circ\text{C}$ 。洗脱程序见表 1。

表 1 液相色谱流动相梯度洗脱程序

Table 1 The procedure of mobile phase gradient elution by liquid chromatography

组成	时间(min)		
	0~4	5~14	15~20
流动相 A(%)	100	0	100
流动相 B(%)	0	100	0

2 结果

2.1 原子荧光工作条件的优化

2.1.1 载流类型的选择 本试验参照国标方法的仪器工作条件(以下各优化试验同样依此进行),分别以 20% HCl 和 20% HNO_3 作载流测定砷混合标准溶液系列。结果表明,当载流为 20% HCl 溶液时,As(III)、DMA、MMA、As(V)四种形态砷的响应强度均更大;标准曲线的相关系数 r 、斜率均较大,说明线性更好、灵敏度更高;二者谱图的基线噪声差别不大。经过分析, HNO_3 具有氧化性,可能会与还原剂硼氢化钾反应,消耗硼氢化钾的量,导致硼氢化钾不足以将形态砷还原成砷化氢,造成响应值偏低、线性差的结果。因此,选择载流类型为 HCl 溶液。

2.1.2 盐酸浓度的选择 分别选择 3%~30% 的 HCl 溶液作为载流,测定 30 $\mu\text{g/L}$ 砷标准溶液,探讨形态砷的峰面积、基线噪声随 HCl 浓度的变化情况。如图 1 所示,随着 HCl 浓度增大,As(V)的峰面积急剧增大;As(III)峰面积变化不明显;HCl 浓度为 5% 时,DMA 和 MMA 峰面积达到最大。HCl 浓度增大,基线噪声差别不大。因此,选择盐酸浓度为 5%。

2.1.3 硼氢化钾 KBH_4 浓度的选择 KBH_4 作为氢化物生成的还原剂,对氢化物的生成具有重要作用。浓度过小则砷不能彻底还原,浓度过高则会使气流过大导致荧光强度下降^[9]。以 5 g/L 氢氧化钠为溶剂,配制

10 ~ 50 g/L 的 KBH_4 溶液, 测定 30 $\mu\text{g/L}$ 的形态砷混合标准溶液, 考察 KBH_4 浓度对 As(III) 、 DMA 、 MMA 、 As(V) 的峰面积、基线噪声的影响, 如图 2 所示, 随着 KBH_4 浓度增加, 砷的峰面积增大, 但噪声也增大。综合考虑响应强度、噪声、信噪比和 KBH_4 消耗量, 选择 KBH_4 浓度为 20 g/L, 这与王林裴等人^[9]的研究一致。

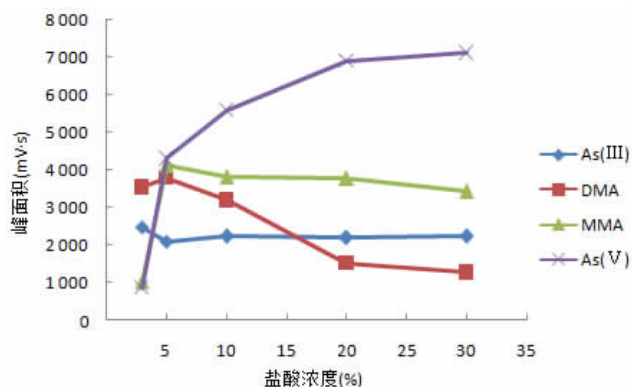


图 1 盐酸浓度对形态砷峰面积的影响

Figure 1 Effect of hydrochloric acid concentration on the peak area of morphological As

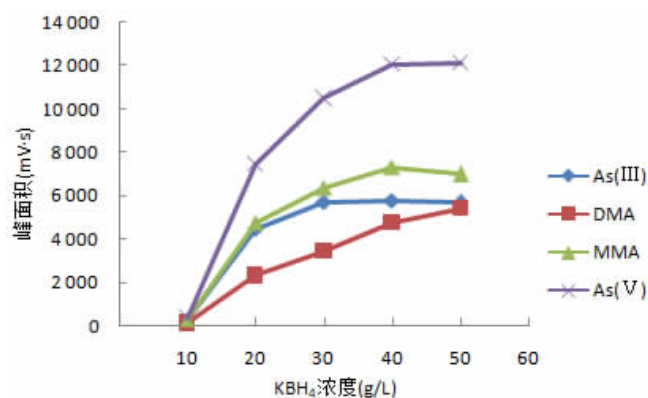


图 2 KBH_4 浓度对形态砷峰面积的影响

Figure 2 Effect of KBH_4 concentration on the peak area of morphological As

2.1.4 光电倍增管负高压的选择 设定 230V、250V、270V、300V、330V 五种负高压, 测定 30 $\mu\text{g/L}$ 砷标准溶液, 考察光电倍增管负高压对形态砷峰面积、噪声、信噪比的影响。结果显示, 负高压增加, 峰面积增大, 但噪声也增大; 当负高压由 270V 增至 300V 时, 噪声急剧增加, 信噪比逐渐降低。由于负高压过高会减少光电倍增管的使用寿命, 综合考虑, 选择负高压为 270V。

2.1.5 灯电流的选择 原子荧光光谱分析中, 灯电流越大, 砷空心阴极灯的激发光强度越强, 砷的响应值越高, 噪声也越大, 但灵敏度不一定增加; 若灯电流过大, 空心阴极灯会发生自吸现象, 且会影响灯的寿

命。实验设定 30/15 mA、40/20 mA、55/27 mA、60/30 mA、75/37 mA 五种主/辅电流, 测定 30 $\mu\text{g/L}$ 砷标准溶液, 考察灯电流对形态砷峰面积、信噪比的影响。结果显示, 主电流增大, 峰面积、噪声不断增加, 这与夏拥军^[10]的研究结果一致。为了在增加峰面积的同时, 提高灵敏度, 减小灯自吸现象, 延长灯寿命, 选择灯电流为 60/30 mA。

2.2 液相色谱工作条件的优化 目前文献对液相色谱工作条件的优化大多只关注流动相浓度或 pH 对砷形态组分的保留时间和分离情况的影响, 较少考虑对峰面积、基线噪声、灵敏度、色谱柱寿命等的影响。李鑫^[11]在研究海产品形态砷测定方法时, 只探讨流动相浓度、pH 对形态砷分离效果的影响。林建杰^[12]在测定海藻中形态砷含量时, 只研究流动相 pH 对分离效果的影响。

文章该部分较充分地研究了流动相的影响情况, 包括 A 相、B 相磷酸二氢铵溶液的浓度和 pH, 对形态砷的保留时间、分离效果、峰面积、灵敏度、色谱柱寿命等的影响。

2.2.1 流动相 B 磷酸二氢铵浓度的选择 配制 20 ~ 40 mmol/L 磷酸二氢铵溶液, 测定 50 $\mu\text{g/L}$ 砷混合溶液, 探究流动相 B 浓度对形态砷峰面积及保留时间的影响。结果如图 3、4 所示, 流动相 B 浓度增大, 四种形态砷峰面积变化不大, 且分离度始终良好; As(III) 和 DMA 、 MMA 保留时间几乎稳定; 由 20 mmol/L 升至 25 mmol/L 时, As(V) 保留时间有较明显缩短。流动相浓度越大, 则离子强度越高, 而离子强度过高会影响阴离子色谱柱的寿命^[13]。综合峰面积、分离效果、色谱柱寿命, 选择流动相 B 浓度为 25 mmol/L。

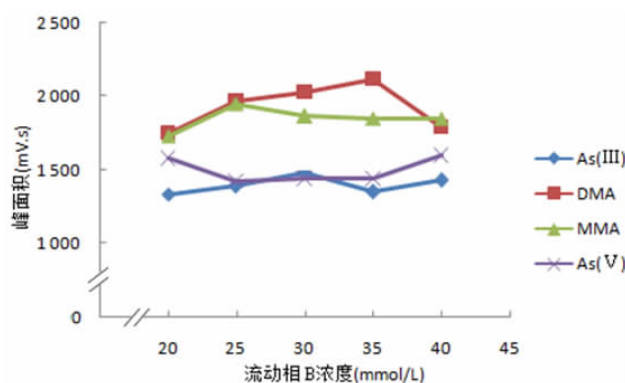


图 3 流动相 B 浓度对形态砷峰面积的影响

Figure 3 Effect of mobile phase B concentration on the peak area of morphological As

2.2.2 流动相 B 磷酸二氢铵 pH 的选择 配制浓度为 25 mmol/L, pH 为 6.0 ~ 10.0 的五种磷酸二氢铵溶液, 测定 50 $\mu\text{g/L}$ 砷标准溶液, 考察流动相 B 的 pH 值

对形态砷峰面积、分离效果、基线噪声的影响。结果如图 5、6 所示, pH 增大, As(III)峰面积减小, 保留时间增大; As(V)峰面积先增大后减小, 保留时间减少; DMA、MMA 峰面积始终较大, 保留时间的变化不影响整体的分析时间和分离度; pH 为 10 时, 基线噪声过高。pH 过大, 流动相偏碱性会使部分砷化合物保留在阴离子色谱柱中, 可能会缩短色谱柱的寿命^[13]。综合考虑峰面积、分离效果, 分析时间、噪声、色谱柱寿命等, 选择流动相 B 的 pH 为 8.0。

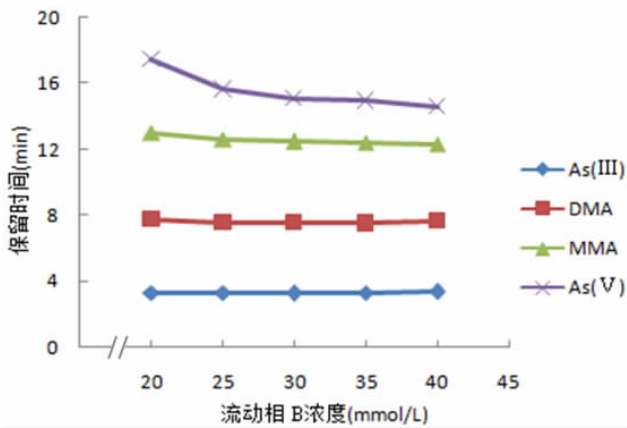


图 4 流动相 B 浓度对形态砷保留时间的影响

Figure 4 Effect of mobile phase B concentration on the retention time of morphological As

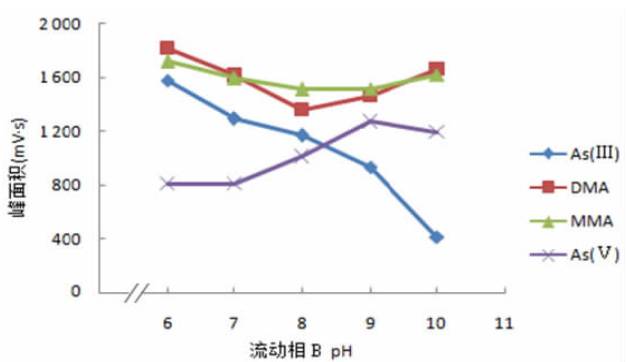


图 5 流动相 B 的 pH 对形态砷峰面积的影响

Figure 5 Effect of PH of mobile phase B on the peak area of morphological As

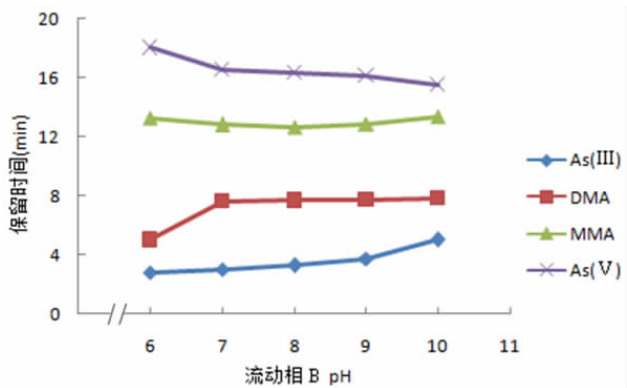


图 6 流动相 B 的 pH 对形态砷保留时间的影响

Figure 6 Effect of pH of mobile phases B on the retention time of morphological As

2.2.3 流动相 A 磷酸二氢铵浓度与 pH 的选择 由于海产品中无毒的 AsB 含量高, 剧毒的 As(III)含量较低, 两者的保留时间接近, 若没有完全分离, As(III)的测定会受到 AsB 干扰, 其检测结果将偏高。因此, 需要考察流动相 A 浓度与 pH 对 AsB 和 As(III)分离度的影响, 同时考虑对响应强度的影响。

考察流动相 A 的 pH 9.0, 浓度为 1、3、5、7 和 10 mmol/L 时的影响情况。结果, 随着浓度增加, As(III)峰面积增大, 但 As(III)与 AsB 分离度下降。综合考虑峰面积和分离效果, PH 9.0 时, 7 mmol/L 的效果较好。

考察流动相 A 的 pH 8.5, 浓度为 1、3、5、7 和 10 mmol/L 时的影响情况。结果, 仅当流动相 A 为 1 mmol/L 时, As(III)和 AsB 能良好分离, 其他浓度均未能完全分离。

比较 7 mmol/L、pH 9.0 和 1 mmol/L、pH 8.5, 发现 7 mmol/L、pH 9.0 时基线噪声较大, 形态砷的峰面积较低, 因此选择流动相 A 浓度为 1 mmol/L, pH 8.5。

2.3 蠕动泵转速和洗脱程序的选择 国标方法中, 原子荧光蠕动泵转速为 60 r/min, 液相色谱洗脱程序为: 0 ~ 8 min, 100% 流动相 A; 10 ~ 20 min, 100% 流动相 B; 22 ~ 32 min, 100% 流动相 A。此条件下, 分析时间长, 试剂消耗量大。本试验转速降至 45 r/min, 洗脱程序改为表 1 所示的梯度程序时, 能大大缩短分析时间, 减少 HCl 溶液和 KBH₄ 溶液的消耗量, 节约试剂, 提高工作效率。且四个形态砷的响应值、标准曲线都良好。因此, 选择转速为 45 r/min, 洗脱程序为表 1 的梯度程序。

2.4 标准曲线、检出限 用优化后条件测定 0 ~ 100 μg/L 的 As(III)、DMA、MMA、As(V) 混合标准系列, 以峰面积为纵坐标, 浓度为横坐标, 绘制标准曲线。以 3 倍、10 倍噪音水平所相当的浓度计算检出限、定量限。As(III)、DMA、MMA、As(V) 的相关系数均大于 0.999; 检出限为 0.02 mg/kg, 定量限为 0.05 mg/kg。见表 2。

表 2 形态砷的标准曲线及相关系数

Table 2 Standard curves and correlation coefficients of morphological As

名称	保留时间 (min)	线性方程	相关系数 r
As(III)	2.839	Y=44.278X-19.407	0.999 5
DMA	6.526	Y=44.712X-46.621	0.999 6
MMA	8.158	Y=42.789X+55.941	0.999 5
As(V)	12.363	Y=27.196X-49.853	0.999 2

2.5 精密度和准确度 以海蛭、鱼为本底, 分别加入 20、40 和 80 μg/L 三种浓度的砷标准溶液, 按方法进行前处理后检测, 回收率见表 3。As(III)、DMA、MMA、

As(V)的加标回收率为 81.2% ~ 111.6%。对海蛭为本底,加砷标准溶液 40 μg/L 的样品提取液,重复测定 6 次,计算相对标准偏差 RSD。As(III)、DMA、MMA、As

(V)出峰时间的 RSD 各为 0.6%、0.3%、0.3%、0.4%;峰面积的 RSD 各为 4.1%、4.2%、1.7%、4.5%。可见,峰面积及保留时间的 RSD 均小于 5%,变异程度较小。

表 3 样品的加标回收率

Table 3 Spiked recovery rate of samples

样本	砷形态	本底值(μg/L)	加标量(μg/L)	测定值(μg/L)	回收率(%)
海蛭	As(III)	ND	20	22.31	111.6
		ND	40	41.63	104.1
		ND	80	84.81	106.0
	DMA	ND	20	16.98	84.9
		ND	40	37.94	94.8
		ND	80	84.74	105.9
	MMA	ND	20	17.17	85.8
		ND	40	37.01	92.5
		ND	80	72.13	90.2
As(V)	ND	20	16.44	82.2	
	ND	40	38.85	97.1	
	ND	80	65.92	82.4	
鱼	As(III)	ND	20	19.34	96.7
		ND	40	38.69	96.7
		ND	80	86.84	108.6
	DMA	ND	20	17.43	87.2
		ND	40	37.15	92.9
		ND	80	78.89	98.6
	MMA	ND	20	16.25	81.2
		ND	40	32.6	81.5
		ND	80	70.57	88.2
	As(V)	ND	20	16.92	84.6
		ND	40	38.6	96.5
		ND	80	69.78	87.2

注:ND 为未检出。

2.6 标准色谱图 以优化条件测定 100 μg/L 砷标准溶液,色谱图如图 7。As(III)、DMA、MMA、As(V)的出

峰时间分别为 2.767、6.576、8.108 和 12.474 min。

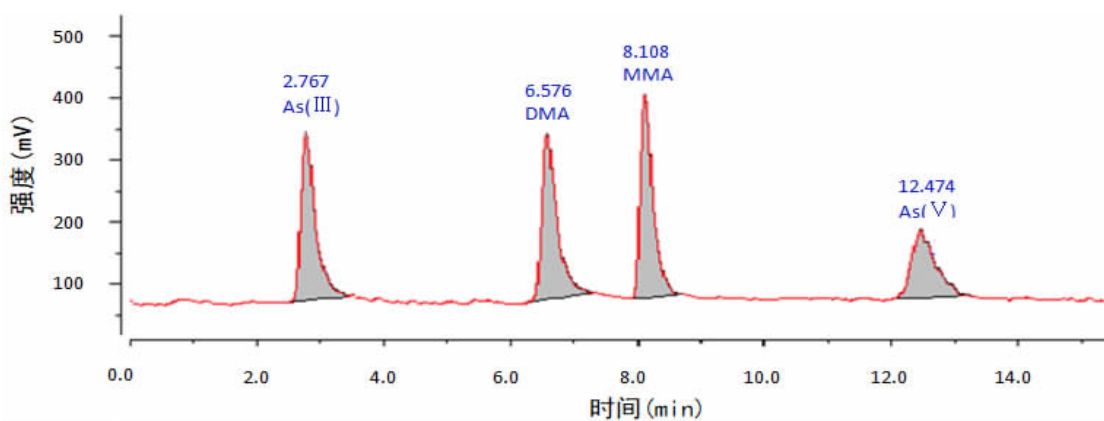


图 7 形态砷标准色谱图

Figure 7 Standard chromatogram of morphological As

2.7 样品测定 海产品中的砷包含多种形态,AsB 是海产品中砷的主要存在形式,通常占总砷的 90% 以上,不同形态的砷的毒性不一^[3-5]。因此,在评估海产品中砷的污染及毒性时,不应以总砷含量进行判

定,而应测定形态砷尤其是无机砷含量。

实际样品测定也证实了这一点,采用 ICP-MS 方法对 64 份泉州市本地海产品的总砷含量进行检测,结果为 0.42 ~ 65.5mg/kg,有 62 份总砷含量超过 0.5

mg/kg(总无机砷限量标准)。进一步采用本文的方法对这 62 份海产品进行形态分析, 结果发现: As(III)、DMA、MMA、As(V)检出份数分别为 2、4、6 和 19 份, 检测值为 0.09 ~ 0.13mg/kg、0.06 ~ 0.16mg/kg、0.05 ~ 0.15 mg/kg、0.05 ~ 0.27 mg/kg。总无机砷超标的有 6 份, 含量为 0.05 ~ 0.27 mg/kg。由此可见, 海产品总砷含量虽高, 但大部份是 AsB, 而 As(III)、DMA、MMA、As(V)不高。实验结果证实了海产品中总砷含量高时, 需要进一步检测形态砷, 才能更好地评估海产品中砷的污染及毒性。

3 讨论

本文优化了 LC-AFS 联用仪的实验条件, 建立了用 LC-AFS 联用技术对海产品中常见的四种砷形态 As(III)、DMA、MMA、As(V)进行有效分离和检测的方法。用建立的方法进行测定, 四种形态砷在 14 min 内分离。在 0 ~ 100 μ g/L 范围, 线性良好, 检出限低, 精密度高, 结果准确可靠。

利益冲突声明 本研究不存在任何利益冲突

参考文献

- [1] 林怡辰. 重金属在近岸海域海产品中的富集及其影响机制研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
Lin YC. The metal of heavy metals in coastal seafood and their influence mechanism [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.(In Chinese)
- [2] Joardar M, Das A, Chowdhury NR, et al. Health effect and risk assessment of the populations exposed to different Arsenic levels in drinking water and foodstuffs from four villages in Arsenic endemic Gaighata block, West Bengal, India [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2021, 43(8): 3027-3053.
- [3] 李思佳, 沈俊毅, 韩若冰. 上海市虹口区市售小龙虾中汞和砷的污染水平分析[J]. 现代食品, 2022, 28(19): 109-113.
Li SJ, Shen JY, Han RB. Analysis of the contamination levels of Mercury and Arsenic in commercially available crayfish in hongkou district, Shanghai [J]. Modern Food, 2022, 28 (19): 109-113.(In Chinese)
- [4] 廖文. 砷和汞生物可给性及形态变化研究 -- 以食品为例 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
Liao W. Study on the bioavailability and morphological changes of arsenic and mercury —— Take food as an example [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.(In Chinese)
- [5] 叶紫君. 砷甜菜碱在海洋青鳉鱼和小鼠体内的代谢过程[D]. 广州: 广州大学, 2023.

- Ye ZJ. Metabolic processes of arsenobetaine in marine medaka fish and mice[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023.(In Chinese)
- [6] 付凤富, 孙颖, 王绪盛, 等. 海产品中砷形态分析研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(2): 341-349.
Fu FF, Sun Y, Wang XS, et al. Research progress on speciation analysis of Arsenic in seafood [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(2): 341-349.(In Chinese)
- [7] 陈晓红, 李晓晓. 海产品中砷形态分析研究进展[J]. 卫生研究, 2020, 49(1): 160-168.
Chen XH, Li XX. Progress in the analysis of arsenic morphology in seafood [J]. Journal of Hygiene Research, 2020, 49 (1): 160-168.(In Chinese)
- [8] 张海珍, 闫爱博, 张坤. 水产品中砷形态分析研究进展[J]. 现代农业科技, 2014, (18): 271-272.
Zhang HZ, Yan AB, Zhang K. Progress in the analysis of arsenic morphology in aquatic products[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2014, (18): 271-272.(In Chinese)
- [9] 王林裴, 周迎春, 华向美, 等. 液相色谱 - 氢化物发生原子荧光光谱法测定水产动物及其制品中的砷形态[J]. 螺河职业技术学院学报, 2018, 17(2): 31-36.
Wang LP, Zhou YC, Hua XM, et al. Measurement of arsenic morphology in aquatic animals and their products by liquid chromatography [J]. Journal of Luohe Vocational and Technical College, 2018, 17(2): 31-36.(In Chinese)
- [10] 夏拥军. 高效液相色谱 - 原子荧光光谱法测定水产品中四种形态砷[J]. 化学计量分析, 2017, 26(5): 46-49.
Xia YJ. Determination of arsenic by HPLC-atomic fluorescence spectral method of four forms in aquatic products [J]. Stoichiometric Analysis, 2017, 26(5): 46-49.(In Chinese)
- [11] 李鑫, 宋涛, 杨艳. 海产品中的砷形态测定方法的研究[J]. 海峡预防医学杂志, 2019, 25(1): 7-10.
Li X, Song T, Yang Y. Study on the detection of Arsenic species in sea foods [J]. Strait Journal of Preventive Medicine, 2019, 25 (1): 7-10.(In Chinese)
- [12] 林建杰. 液相色谱 - 电感耦合等离子体质谱联用法测定常见食用海藻中多种形态砷的含量 [J]. 福建分析测试, 2021, 30 (3): 1-6.
Lin JJ. Determination of as in common edible seaweeds by LC-ICP-MS [J]. Fujian Analysis & Testing, 2021, 30 (3): 1-6.(In Chinese)
- [13] 董会军, 董建芳, 王昕洲, 等. pH 值对 HPLC-ICP-MS 测定水体中不同形态砷化合物的影响 [J]. 岩矿测试, 2019, 38(5): 510-517.
Dong HJ, Dong JF, Wang XZ, et al. Effect of pH on determination of various Arsenic species in water by HPLC-ICP-MS [J]. Rock and Mineral Analysis, 2019, 38(5): 510-517.(In Chinese)

收稿日期: 2024-07-13